浮尘气溶胶对沙漠大气边界层结构作用的昼夜差异

朱从祯[1,2]，赵天良[1,2]，孟　露[2]，杨兴华[3]，何　清[2]，
买买提艾力·买买提依明[2]，杨　婕[1]，朱　燕[1]，吴昭烨[1]

（1. 南京信息工程大学气象灾害预报预警与评估协同创新中心，中国气象局气溶胶-云-降水重点实验室，江苏 南京　210044；2. 中国气象局乌鲁木齐沙漠气象研究所，新疆 乌鲁木齐　830002；3. 山西师范大学地理科学学院，山西 太原　030032）

摘　要：利用2016年7月塔克拉玛干沙漠腹地每日4次强化探空和地面气象观测数据，对比分析了夏季塔克拉玛干沙漠晴日和浮尘日的大气边界层结构变化及地表辐射收支差异，揭示了浮尘气溶胶对大气边界层结构影响作用的昼夜差异及作用机理。结果表明：（1）夜间晴日和浮尘日稳定边界层高度分别为270 m和360 m；晴日稳定边界层逆温强度达到3.1 K·(100m)$^{-1}$，强于浮尘日的1.6 K·(100m)$^{-1}$；白天晴日对流边界层高度接近3600 m，浮尘日仅达2700 m。（2）夜间浮尘气溶胶的向下长波辐射削弱了地表辐射冷却，抬升稳定边界层高度并减弱其稳定度。（3）白天晴日强的太阳短波净辐射加热沙漠地表，其强烈的感热作用形成了超高对流大气边界层；浮尘气溶胶明显减少了地表短波辐射和感热加热，降低了白天对流边界层高度。塔里木盆地独特的浮尘气溶胶辐射效应对沙漠地区大气边界层结构具有昼夜相反的影响。

关键词：塔克拉玛干沙漠；大气边界层结构；浮尘气溶胶辐射效应；昼夜变化

大气边界层是受下垫面直接影响的对流层底层。地-气能量和物质交换，地表的动力和热力强迫作用使得大气边界层结构有着显著的昼夜变化[1]。白天地表接收太阳辐射，驱动对流大气边界层的形成。夜晚地面辐射冷却，形成具有逆温层结的稳定大气边界层。稳定边界层上保留着白天混合层位温变化特征及白天对流边界层大气污染物浓度的层结称作残留混合层[2]。大气边界层作为与人类生活最为密切的低层大气，其内部发生的物理和化学过程直接影响着人类的生存环境，亦与天气和气候变化存在密切关联[3]。

沙粒较小的比热容导致沙漠地区地表昼夜温差较大，下垫面白天较强的地表加热和对流湍流运动形成了特殊的沙漠大气边界层结构[4]。以沙漠为主体的西北干旱区白天对流边界层比中国中部、东部地区发展更加旺盛[5]，夏季巴丹吉林沙漠白天对流边界层高度超过4000 m，大部分净辐射能转化为感热通量，为深厚大气边界层的发展提供了热力基础，较强的对流和湍流则为其提供了动力支持；夜间稳定边界层最厚可达600 m[6-7]。塔克拉玛干沙漠夏季晴日夜间稳定边界层厚度仅为240 m，夜间陆面较强的辐射冷却和微弱的湍流运动是形成较浅薄夜间边界层的主要原因[8]。在撒哈拉沙漠地区，午后对流边界层最高可发展到约500 hPa的6000 m高度，日出后稳定边界层消退过程中其上方存在的深厚且中性的残余层促进了白天对流大气边界层的发展[9-10]。

沙尘气溶胶对沙漠大气边界层结构发展演变的影响作用主要表现为对太阳短波辐射的吸收，并将引起大气垂直方向能量的重新分布，进而对大气边界层的结构变化造成影响[11]。白天，气溶胶通过吸收和散射削弱了到达地表的太阳辐射，使地表接收到的净辐射减少，地表降温感热通量减少，抑制热泡的产生及对流活动，从而降低对流大气边界层

收稿日期：2021-10-13；　**修订日期**：2022-01-03
基金项目：中亚大气科学研究基金项目（CAAS201913）；国家自然科学基金项目（41875019，42030612，41830968）
作者简介：朱从祯（1997-），男，硕士研究生，主要研究方向为大气边界层. E-mail: 20191203040@nuist.edu.cn
通讯作者：赵天良. E-mail: josef_zhao@126.com

高度[12]。吸收性气溶胶会加热大气，形成逆温，进一步抑制边界层发展[13]。重霾期间，大气边界层昼夜变化特征基本消失，大气边界层结构趋于稳定，边界层高度普遍处于1000 m以下[14]。沙尘暴发生时，夜间稳定边界层遭到破坏且高度进一步提升；白天对流边界层的发展被抑制，对流边界层高度较晴日大幅下降[15]。

塔克拉玛干沙漠占据了欧亚大陆腹地的塔里木盆地大部分地区，南部紧邻平均海拔4000 m以上的青藏高原，西面和北面分别被帕米尔高原和天山山脉环绕，是中亚重要的沙尘气溶胶源区之一[16]。受沙漠下垫面热力强迫和塔里木盆地深盆地地形作用，塔克拉玛干沙漠夏季常形成3~5 km高度的超高大气边界层，大气边界层结构有显著区域特殊性[17]。塔克拉玛干沙漠腹地在春夏两季沙尘天气频发，年平均浮尘日数可达200 d以上，大范围浮尘过程可达月尺度，形成独特的浮尘滞空天气现象[18]。目前，针对塔克拉玛干沙漠浮尘滞空现象的浮尘气溶胶对大气边界层结构演变的影响还尚不明确。因此，本文利用2016年7月塔中气象站1 d 4次的强化GPS探空观测数据及地面气象观测数据，对比分析塔克拉玛干沙漠腹地典型晴日和浮尘日的大气边界层结构特征和地表辐射收支差异，以揭示浮尘滞空现象浮尘气溶胶对大气边界层结构演变的影响及其作用机理。

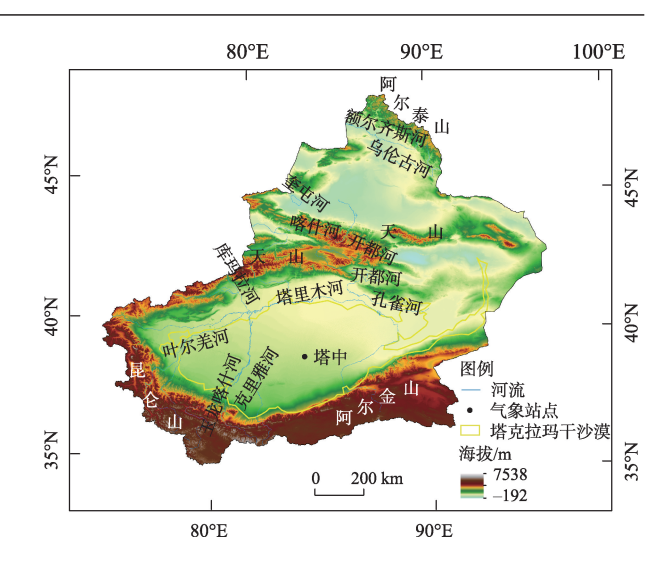
1 数据与方法

1.1 研究区概况

中国气象局塔克拉玛干沙漠环境监测实验站位于塔克拉玛干沙漠腹地塔中地区(38°58′N，83°39′E，海拔高度1099.3 m)(图1)。塔克拉玛干沙漠地处塔里木盆地中央，是世界第二大流动性沙漠。其三面环山，是中亚地区重要的沙尘气溶胶源区之一。试验点地表类型为流动性沙地，能较好地代表塔克拉玛干沙漠腹地的下垫面类型。

1.2 数据来源与处理

利用了中国气象局乌鲁木齐沙漠气象研究所于2016年7月在该试验点进行的为期1个月的1 d 4次强化GPS探空观测及地面观测所得资料。探空观测开始时间分别为01:15(北京时，下同)、07:15、13:15、19:15。探空观测资料的气象要素包括温度、相对湿度、气压、风向和风速。为了更好地分析边界



注：底图采用自然资源部标准地图制作，审图号为GS(2019)3333号，对底图边界无修改。

图1 研究区概况

Fig. 1 Overview of the study area

层结构特征，将探空所得温度和相对湿度转化为位温和比湿[19]。地面观测资料包括了近地层辐射通量及感热通量。塔中地区2016年7月1—31日天气现象按如下标准进行分类：全天晴朗无云划分为晴日；全天连续浮尘且无明显天气过程划分为浮尘日。选取晴日(13日、14日、25日、26日、27日)和浮尘日(5日、12日、17日、18日、21日)的GPS探空数据平均得到晴日和浮尘日夜间(01:15，07:15)与白天(13:15，19:15)气象要素垂直廓线，来分析夏季塔克拉玛干沙漠腹地晴日和浮尘日昼夜边界层气象要素垂直结构的差异。

1.3 研究方法

基于探空得到的气象要素垂直廓线是最为常见的确定大气边界层高度的手段。热力因子在西北沙漠地区大气边界层的发展过程中占主导，因此采用位温廓线法确定大气边界层高度较为可靠[19]。具体方法为：夜间位温廓线的大气逆温强度从地面起超过0.4 K·(100m)$^{-1}$的空间范围确定为贴地逆温，贴地逆温层顶部为稳定边界层高度，稳定边界层以上位温出现明显跃变的高度为残留混合层顶高度[20]；白天位温廓线出现明显位温梯度不连续的折线型逆温层底部为对流边界层高度[21]。

2 结果与分析

2.1 大气边界层位温垂直结构特征

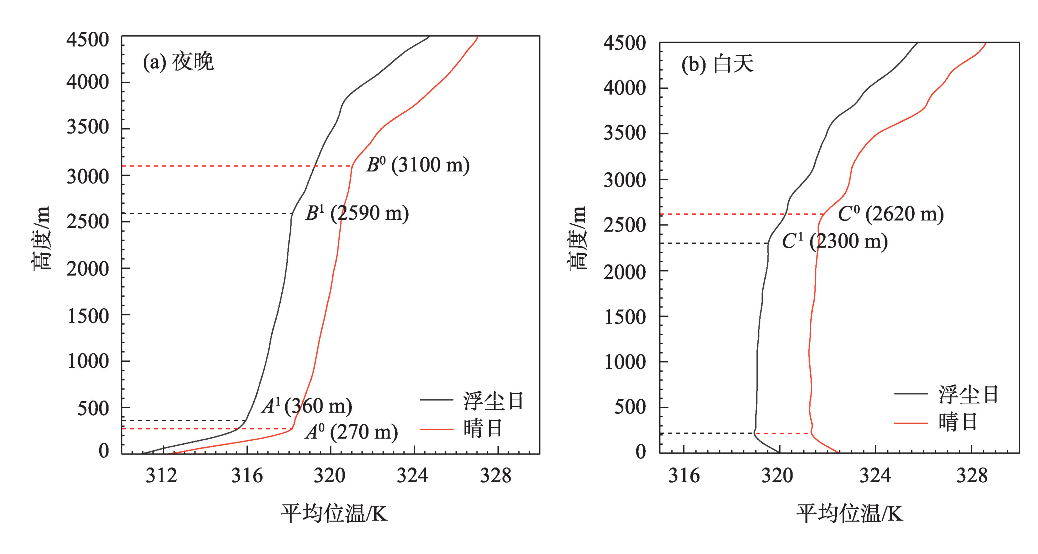
夜间大气边界层由下至上可分为稳定边界层

和残留混合层。夜间位温从地表随高度上升不断增大,这一层为贴地逆温层。贴地逆温层的顶部即夜间稳定边界层的高度。浮尘日夜间稳定边界层内逆温强度达到了1.6 K·(100m)$^{-1}$,稳定边界层高度达到360 m。晴日夜间稳定边界层内逆温强度强于浮尘日,为3.1 K·(100m)$^{-1}$。晴朗无云的夜间,较强的地表冷却有利于形成更大的逆温强度[22],稳定边界层高度为270 m,低于浮尘日。在稳定边界层以上位温变化与白天混合层类似的层结为残留混合层,浮尘日残留混合层顶高度达到2590 m,晴日残留混合层顶高度为3100 m,较浮尘日明显偏高(图2a)。夜间观测时次浮尘日稳定边界层高度均高于晴日,而残留混合层顶高度则低于晴日(表1)。这表明浮尘天气下沙尘气溶胶的存在减弱了夜间稳定边界层的强度,抬升了稳定边界层高度,但降低了残留混合层高度。

白天对流边界层可分为超绝热递减层和混合层。近地面大气位温随高度升高递减,此层为超绝热递减层,浮尘日和晴日超绝热递减层高度无明显差异,都在200 m左右。超绝热递减层上部是位温随高度上升基本保持不变的混合层,浮尘日和晴日混合层高度分别为2300 m,2620 m(图2b)。李岩瑛等[23]在河西走廊地区观测的夏季7月沙尘日最大混合层厚度达2500 m,略低于塔中地区。从13:15—19:15晴日对流边界层高度增加超过1000 m,且晴日对流边界层高度均远高于浮尘日(表1)。沙尘颗粒阻挡了到达地面的太阳辐射使地表加热减弱造成浮尘日对流边界层偏低,晴日更深厚的残留层进一步促进了晴日深厚对流边界层的发展[6,24]。受到晴朗无云条件下较强的地面加热作用,晴日19:15对流边界层高度接近3600 m,与张强等[4]在敦煌干旱区观测到的晴日对流边界层高度较为接近。

2.2 大气边界层水平风速垂直结构特征

塔克拉玛干沙漠塔中站晴日和浮尘日大气边界层动力特征也有着明显差异。夜间稳定边界层水平风速随高度的上升呈增加趋势,稳定边界层内



注:A表示稳定边界层顶高度;B表示残留混合层顶高度;C表示对流边界层顶高度;上标0,1分别代指晴日和浮尘日。

图2 2016年7月塔中站晴日和浮尘日平均位温垂直分布特征

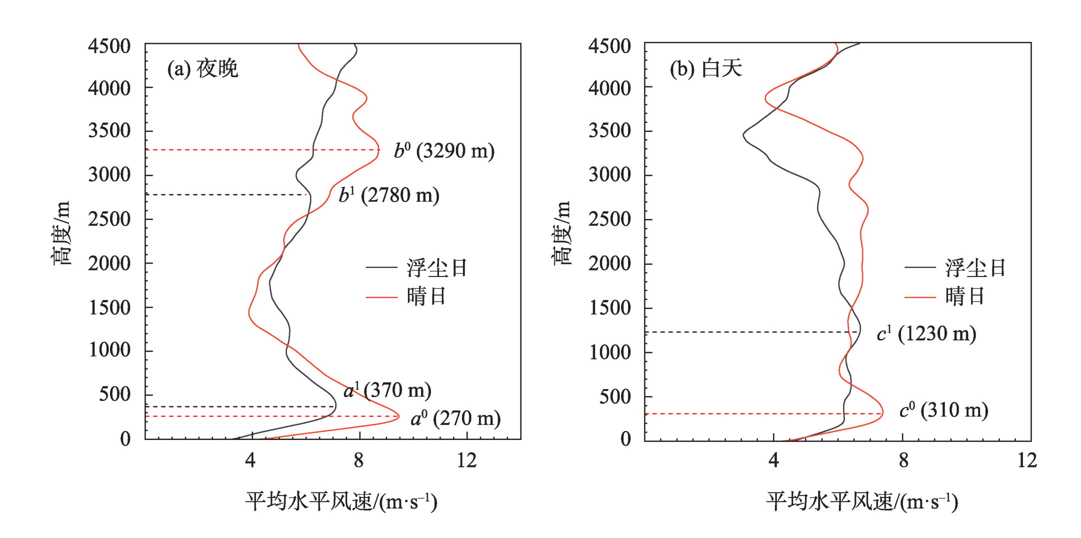
Fig. 2 Vertical distribution characteristic of mean potential temperature on sunny days and floating dusty days at Tazhong Station in July 2016

表1 2016年7月塔中站晴日和浮尘日大气边界层结构特征变化

Tab. 1 Changes of atmospheric boundary layer structure characteristics on sunny days and floating dusty days at Tazhong Station in July 2016

	01:15	07:15	01:15	07:15	13:15	19:15
	稳定边界层顶/m		残留混合层顶/m		对流边界层顶/m	
晴日	220	290	3340	3060	2490	3580
浮尘日	270	460	2800	2430	2220	2710

晴日水平风速均大于浮尘日，稳定边界层以上出现了水平风速的高值。晴日高值为9.4 m·s⁻¹，这是夜间大气边界层趋于稳定后湍流减弱，科氏力诱发惯性震荡形成的大气边界层低空急流[25]。浮尘日稳定边界层以上水平风速高值为7.2 m·s⁻¹，明显低于晴日且小于低空急流8 m·s⁻¹的标准[26]。夜间贴地逆温层使湍流活动减弱，抑制上下层物质和能量的输送，使剪切湍流能量在逆温层堆积，促进边界层低空急流的发展[27]。晴日较强的贴地逆温导致晴日边界层低空急流明显强于浮尘日。晴日和浮尘日进入残留混合层后水平风速随高度上升均表现为先减小后增大的趋势，晴日残留混合层顶上部水平风速高值达8.7 m·s⁻¹，浮尘日为6.2 m·s⁻¹，较晴日明显偏低(图3a)。01:15晴日和浮尘日大气边界层低空急流风速差异不明显，都超过8 m·s⁻¹。07:15晴日大气边界层低空急流风速增强到10.4 m·s⁻¹，而浮尘日大气边界层低空急流风速则较01:15明显减弱。晴日和浮尘日夜间大气边界层低空急流出现高度也随时间逐步抬升，但浮尘日高度抬升更显著(表2)。这表明，浮尘日大气沙尘气溶胶的夜间长波辐射强迫效应，不仅改变大气边界层的垂直结构，也影响边界层的时间演变特征。



注：*a*表示低空急流高度；*b*表示残留混合层顶上部平均水平风速高值高度；*c*表示对流边界层平均水平风速最大值高度；上标0,1分别代指晴日和浮尘日。

图3　2016年7月塔中站晴日和浮尘日平均水平风速垂直分布特征

Fig. 3　Vertical distribution characteristic of mean horizontal wind speed on sunny days and floating dusty days at Tazhong Station in July 2016

表2　2016年7月塔中站晴日和浮尘日夜间大气边界层低空急流风速及出现高度

Tab. 2　Wind speed and height of low-level boundary layer jet at nigh on sunny days and floating dusty days at Tazhong Station in July 2016

	01:15	07:15	01:15	07:15
	低空急流风速/(m·s⁻¹)		低空急流高度/m	
晴日	8.6	10.4	230	300
浮尘日	8.1	6.1	300	490

白天沙漠强烈的地表加热促进了大气边界层对流发展。晴日近地面超绝热递减层水平风速随高度上升增加剧烈，风速最大值为7.4 m·s⁻¹，出现在超绝热递减层以上。随后对流边界层水平风速随高度上升先减小后增大，波动幅度不大，都在6 m·s⁻¹左右，对流边界层顶风速的增加幅度相对较小。浮尘日近地面超绝热递减层水平风速随高度上升增加幅度较晴日弱，整体对流边界层水平风速随高度上升先增大后减小，风速最大值为6.6 m·s⁻¹，出现在对流边界层中部。晴日对流边界层水平风速整体大于浮尘日，较大的风速促进了湍流活动，使晴日对流边界层发展更加旺盛(图3b)。浮尘日边界层较小的水平风速易导致沙尘气溶胶的本地累积，导致浮尘天气的持续[28]。

2.3　大气边界层水汽垂直结构特征

由于大气边界层热力和动力垂直结构的差异，塔克拉玛干沙漠塔中站晴日和浮尘日大气边界层

水汽垂直分布有明显的区别。夜间晴日稳定边界层比湿随高度上升而减小,进入残留混合层后比湿随高度上升基本保持不变。晴日比湿极大值4.7 g·kg^{-1}出现在近地面,残留混合层比湿保持在4.1 g·kg^{-1}左右。浮尘日比湿随高度变化趋势与晴日类似,但近地面比湿极大值为6.4 g·kg^{-1},残留混合层比湿保持在5.6 g·kg^{-1}左右。总体来看,夜间浮尘日边界层比湿大于晴日(图4a)。

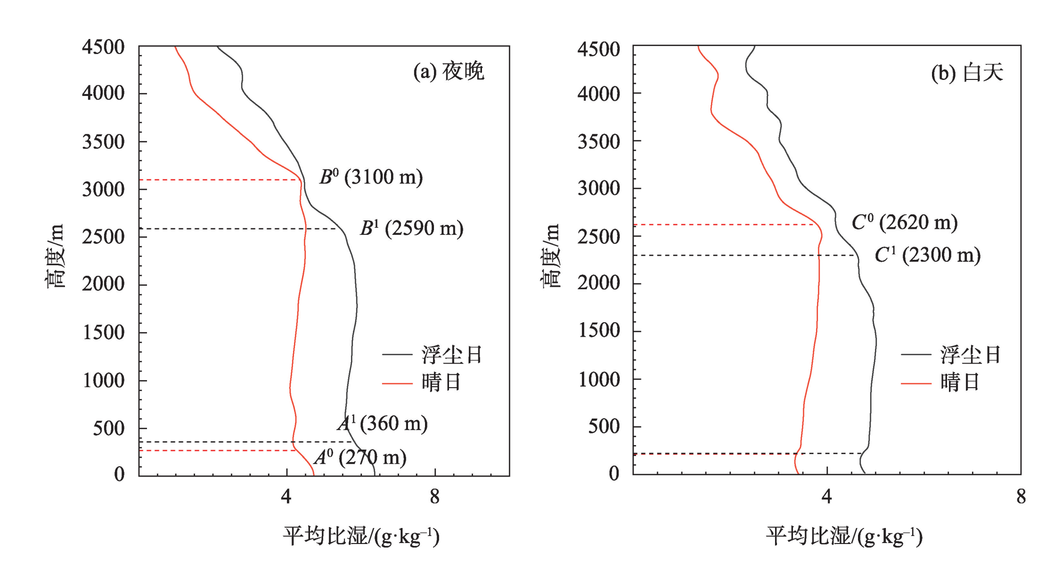
白天晴日和浮尘日超绝热递减层比湿都随高度增加先减小后增大。混合层比湿分布与夜间残留混合层类似,晴日和浮尘日混合层内比湿分别保持在3.5 g·kg^{-1}和4.8 g·kg^{-1}左右。整体来看,浮尘日对流边界层比湿大于晴日(图4b)。晴日条件下,位于季风区的洱海湖滨农田下垫面夜间残留混合层和白天混合层比湿超过5 g·kg^{-1},明显高于塔中地区[29]。塔克拉玛干沙漠地区植被稀少地表干燥,较少的地表蒸发使空气湿度也较低。杜一博等[5]在敦煌干旱区观测到的晴日夜间残留混合层和白天混合层比湿结果则与塔中地区接近。

无论夜晚还是白天,浮尘日边界层比湿均大于晴日。夜间浮尘日比湿较高与高潜热通量有关,这将进一步抑制稳定边界层内对流和湍流的发生,有利于稳定大气边界层的发展[30]。白天浮尘日沙尘气溶胶的辐射效应使到达地表的太阳辐射减少进而使湍流垂直混合减弱。边界层高度偏低,较弱的湍流活动使水汽易于在边界层内累积,同时通过夹卷作用进入边界层的干空气减少也导致较晴日更大浮尘日比湿[31]。

2.4 地表辐射收支变化及其对大气边界层结构影响

大气边界层结构很大程度上由地表的热力强迫及地-气热力交换决定。地表辐射是白天对流边界层和夜间逆温层发展的热力强迫来源[13]。白天沙尘气溶胶通过吸收和散射太阳辐射使地面短波辐射收入明显减弱,同时增大地面长波辐射收入;夜间地面没有短波辐射收入,沙尘气溶胶主要增大向下长波辐射,从而改变地表辐射收支[32]。因此,利用塔中站地面观测的晴日和浮尘日辐射通量和感热通量,分析昼夜晴日和浮尘日地表辐射收支变化及其对大气边界层结构的影响。

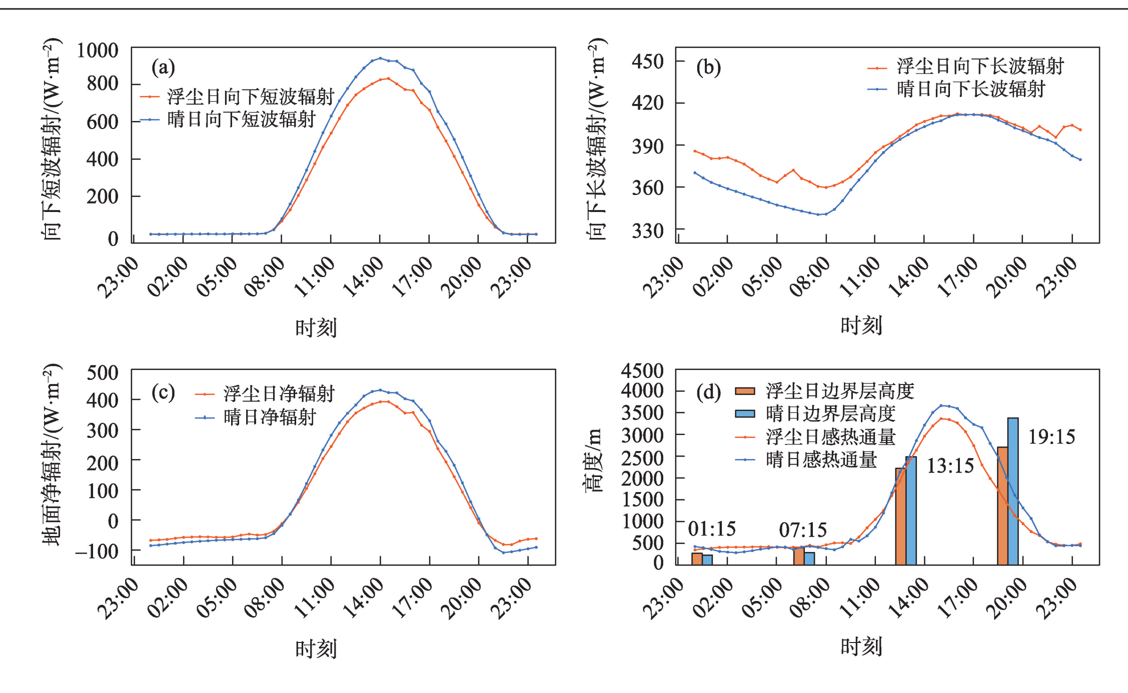
白天地表净辐射为地表净短波辐射与地表净长波辐射之和。由于沙尘气溶胶对太阳辐射的散射和吸收,浮尘日到达地表的向下短波辐射明显减少,向下短波辐射在晴日正午14:00左右达到峰值940 W·m^{-2}。浮尘日正午峰值则为830 W·m^{-2}。同时,晴日白天向下短波辐射值均大于浮尘日(图5a)。向上短波辐射和向上长波辐射也随之减少,向下长波辐射则略微增大。白天地表净辐射主要取决于向下短波辐射变化,浮尘日向下短波辐射的减少使得地表净辐射也显著减少(表3)。净辐射晴日



注:*A*表示稳定边界层顶高度;*B*表示残留混合层顶高度;*C*表示对流边界层顶高度;上标0,1分别代指晴日和浮尘日。

图4 2016年7月塔中站晴日和浮尘日平均比湿垂直分布特征

Fig. 4 Vertical distribution characteristic of mean specific humidity on sunny days and floating dusty days at Tazhong Station in July 2016



注:01:15、07:15为稳定边界层;13:15、19:15为对流边界层。

图5 2016年7月塔中站晴日和浮尘日向下短波辐射日变化(a)、向下长波辐射日变化(b)、地面净辐射日变化(c)、地表感热通量日变化与大气边界层高度关系(d)

Fig. 5 Diurnal variations of downward shortwave radiation (a), diurnal variations of downward longwave radiation (b), diurnal variations of surface net radiation (c), relationship between diurnal variation of surface sensible heat flux and atmospheric boundary layer height (d)

表3 2016年7月塔中站晴日和浮尘日辐射通量日总量对比

Tab. 3 Comparison of daily total radiation fluxes on sunny days and floating dusty days at Tazhong Station in July 2016

	向下短波辐射/(MJ·m^{-2})		向上短波辐射/(MJ·m^{-2})		向下长波辐射/(MJ·m^{-2})		向上长波辐射/(MJ·m^{-2})		净辐射/(MJ·m^{-2})	
	白天	夜晚	白天	夜晚	白天	夜晚	白天	夜晚	白天	夜晚
晴日	28.04	0	7.02	0	20.95	11.50	31.20	13.99	10.77	-2.49
浮尘日	23.87	0	6.02	0	21.56	12.73	30.76	14.30	8.65	-1.57

正午峰值达430 W·m^{-2},浮尘日正午峰值明显小于晴日,为390 W·m^{-2},同样晴日白天净辐射值均大于浮尘日(图5c)。塔克拉玛干沙漠地区植被稀少地表干燥,实际蒸发极弱以及地表沙砾小的比热容使得白天大部分净辐射转化为感热通量[33]。感热通量从清晨到正午显著增大,晴日最大值可达到320 W·m^{-2}并可维持在300 W·m^{-2}左右数小时,而浮尘日最大值在280 W·m^{-2}左右,地表感热通量加热大气并激发大气对流发展,晴日对流边界层高度能达到3000 m以上,较浮尘日高出近1000 m(图5d)。沙漠地区地表净辐射配合高的感热通量转化率促进了热对流的产生,加剧了垂直方向上的湍流扩散,使晴日对流边界层的发展旺盛。我国东北、长三角地区及华北平原夏季清洁条件下对流边界层平均最大高度在1500 m左右,明显低于塔克拉玛干沙漠地区晴日条件下对流边界层高度[34]。沙漠地区下垫面干燥,强烈的太阳辐射和感热加热使其能够形成比一般地区更为深厚的对流大气边界层。

夜间地表净辐射取决于向下长波辐射和向上长波辐射的差值。浮尘日主要由于沙尘气溶胶向下放射和反射长波辐射使向下长波辐射较晴日明显增大,夜间浮尘日地面接收的向下长波辐射较晴日地面接收长波辐射平均增大近20 W·m^{-2}(图5b)。夜间地表净辐射主要取决于向下长波辐射变化,浮尘日向下长波辐射的增加使得地表净辐射也显著增大(表3)。地表净辐射在21:00左右转为负值,夜间晴日净辐射谷值可达到-110 W·m^{-2}。浮尘日由于较大的向下长波辐射使得净辐射谷值明显增大,为-80 W·m^{-2},且夜间浮尘日净辐射均大于晴日(图5c)。负的地表净辐射表示夜间地表向外辐

射冷却,强烈的地表辐射冷却使得地面降温快于上层大气,增强贴地逆温强度[35]。晴日地表辐射冷却较浮尘日更强,是由于浮尘气溶胶的向下长波辐射削弱了地表辐射冷却(表3)。感热通量是指由于温度变化而引起的大气与下垫面之间发生的湍流形式的热交换。夜间地表感热通量为负,地面冷却地表大气,热对流受到抑制,而夜间浮尘日稳定边界层高度较晴日高(图5d)。浮尘日沙尘气溶胶增强了向下长波辐射,削弱地表辐射冷却从而抬升稳定边界层高度,同时减弱夜间稳定边界层逆温强度。

塔克拉玛干沙漠地区浮尘气溶胶的辐射效应对大气边界层结构存在重要影响。夜间浮尘气溶胶放射和反射长波辐射,使向下长波辐射较晴日增大。较强的向下长波辐射削弱了地表辐射冷却,从而抬升夜间稳定边界层高度,并减弱稳定边界层逆温强度和稳定性。白天沙漠地区地表净辐射配合高的感热通量转化率加剧了大气热对流。因此,晴日出现超高的对流边界层。浮尘气溶胶吸收和散射太阳短波辐射,使地表短波辐射和感热加热较晴日明显减少,降低了白天对流边界层高度,增强了对流边界层的稳定性。塔里木盆地独特的"滞空"浮尘气溶胶的辐射效应对大气边界层结构具有昼夜相反的影响。

3 讨 论

考虑到天气过程对大气边界层结构的影响,未来将利用客观分型方法对塔里木盆地浮尘过程进行天气学分型,以探究浮尘日不同天气形势对大气边界层结构的影响。由于缺少沙尘气溶胶的垂直观测,限制了大气辐射传输模型的计算。下一步我们将利用夏季在塔中开展的沙尘气溶胶和气象要素的同步垂直观测资料开展沙尘气溶胶的辐射效应模拟研究,并评估目前模型的问题。受限于缺乏塔克拉玛干沙漠地区长时间序列的多区域探空观测资料,本文尚未完整对比大气边界层结构的季节及区域变化特征。未来将利用更加完善的多平台加密观测,提高观测的分辨率,以便更加全面地研究沙漠地区大气边界层的结构变化。

4 结 论

为了认识大气边界层结构和浮尘气溶胶相互作用,利用塔克拉玛干沙漠腹地塔中站2016年夏季强化探空观测及地面自动气象站资料对比分析了晴日和浮尘日大气边界层结构的差异及浮尘气溶胶辐射效应对其的影响,得出以下结论:

(1) 夏季夜间晴日稳定边界层高度达到270 m,浮尘日大于晴日,为360 m。晴日稳定边界层逆温强度达到3.1 K·(100m)$^{-1}$,大于浮尘日的1.6 K·(100m)$^{-1}$。残留混合层顶高度在夜间随时间推移降低,晴日残留混合层顶高度大于浮尘日。白天晴日对流边界层高度接近3600 m,浮尘日仅达2700 m,整体来看,晴日对流边界层高度高于浮尘日。体现了浮尘气溶胶辐射效应对大气边界层结构昼夜相反的影响。

(2) 晴日和浮尘日大气边界层的动力特征及水汽分布有着明显区别。夜间晴日和浮尘日稳定边界层顶以上都存在大气边界层低空急流,晴日急流风速最大达10.4 m·s^{-1},浮尘日仅为8.1 m·s^{-1}。白天对流边界层晴日水平风速最大达7.4 m·s^{-1},浮尘日为6.6 m·s^{-1}。整体而言,晴日对流边界层水平风速大于浮尘日。夜间稳定边界层内比湿存在最大值,浮尘日达6.4 g·kg^{-1},晴日为4.7 g·kg^{-1}。进入残余混合层比湿大小随高度上升基本保持不变。夜间浮尘日大气边界层内比湿均大于晴日。白天浮尘日对流边界层比湿维持在4.8 g·kg^{-1}左右,大于晴日的3.5 g·kg^{-1}。

(3) 夜间浮尘气溶胶使浮尘日向下长波辐射较晴日增大。较强的向下长波辐射削弱了地表辐射冷却,从而抬升夜间稳定边界层高度,并减弱稳定边界层逆温强度和稳定性。白天沙漠地区地表净辐射配合高的感热通量转化率加剧了大气热对流,因此晴日出现超高的对流边界层。浮尘气溶胶使浮尘日地表短波辐射和感热加热较晴日明显减少,降低了白天对流边界层高度,增强了对流边界层的稳定性。

参考文献(References):

[1] Lenschow D H. Probing the Atmospheric Boundary Layer[M]. Boston, MA: American meteorological Society, 1986.
[2] Roland B S. An Introduction to Boundary Layer Meteorology[M]. Dordrecht: Springer, 1988.
[3] Alexander B, Branko G. Atmospheric Boundary Layers[M]. New York: Springer, 2007.
[4] 张强, 王胜, 张杰, 等. 干旱区陆面过程和大气边界层研究进展

[J]. 地球科学进展, 2009, 24(11): 1185−1194. [Zhang Qiang, Wang Sheng, Zhang Jie, et al. The progresses on land surface processes and atmospheric boundary layer in arid regions[J]. Advances in Earth Science, 2009, 24(11): 1185−1194.]

[5] 杜一博, 张强, 王凯嘉, 等. 西北干旱区夏季晴天、阴天边界层结构及其陆面过程对比分析[J]. 高原气象, 2018, 37(1): 148−157. [Du Yibo, Zhang Qiang, Wang Kaijia, et al. The Northwest arid areas in summer sunny day, cloudy day boundary layer structure and land surface process comparison analysis[J]. Plateau Meteorology, 2018, 37(1): 148−157.]

[6] 赵采玲, 吕世华, 韩博, 等. 夏季巴丹吉林沙漠残余层与深厚对流边界层的关系研究[J]. 高原气象, 2016, 35(4): 1004−1014. [Zhao Cailing, Lyu Shihua, Han Bo, et al. Relationship between the convective boundary laye and residual layer and over Badain Jaran Desert in summer[J]. Plateau Meteorology, 2016, 35(4): 1004−1014.]

[7] 李建刚, 奥银焕, 李照国, 等. 巴丹吉林沙漠夏季大气边界层结构[J]. 中国沙漠, 2014, 34(2): 488−497. [Li Jiangang, Ao Yinhuan, Li Zhaoguo, et al. Characteristics of atmospheric boundary layer over the Badain Jaran Desert in summer[J]. Journal of Desert Research, 2014, 34(2): 488−497.]

[8] 张建涛, 何清, 王敏仲, 等. 塔克拉玛干沙漠腹地夜间稳定边界层观测个例分析[J]. 高原气象, 2018, 37(3): 826−836. [Zhang Jiantao, He Qing, Wang Minzhong, et al. A case analysis of nighttime stable boundary layer observation in the hinterland of Taklimakan Desert[J]. Plateau Meteorology, 2018, 37(3): 826−836.]

[9] Messager C, Parker D J, Reitebuch O, et al. Structure and dynamics of the Saharan atmospheric boundary layer during the West African monsoon onset: Observations and analyses from the research flights of 14 and 17 July 2006[J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 2010, 136(S1): 107−104.

[10] Garcia-carreras L, Parker D J, Marsham J H, et al. The turbulent structure and diurnal growth of the Saharan atmospheric boundary layer[J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 2015, 72(2): 693−713.

[11] Ana L Q, Irina N S, Owen B T. Influence of the aerosol vertical distribution on the retrievals of aerosol optical depth from satellite radiance measurements[J]. Geophysical Research Letters, 2000, 27(21): 3457−3460.

[12] Yu H B, Liu S C, Dickinson R E. Radiative effects of aerosols on the evolution of the atmospheric boundary layer[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2002, 107(D12): AAC 3- 1−AAC 3−14.

[13] Florent M, Véronique P, Marc M, et al. Simulation of aerosol radiative effects over West Africa during DABEX and AMMA SOP−0[J]. John Wiley & Sons, Ltd, 2011, 116(D8): 1−22.

[14] 曹蔚, 赵天良, 徐祥德, 等. 基于加密探空观测的成都市一次重霾污染过程中大气边界层气溶胶垂直结构分析[J]. 地球化学, 2020, 49(3): 344−352. [Cao Wei, Zhao Tianliang, Xu Xiangde, et al. Observation analysis of aerosol vertical structures in boundary layer during a heavy haze event in Chengdu based on intensive sounding measurements[J]. Geochimica, 2020, 49(3): 344−352.]

[15] Wang Minzhong, Wei Wenshou, He Qing, et al. Summer atmospheric boundary layer structure in the hinterland of Taklimakan Desert, China[J]. Journal of Arid Land, 2016, 8(6): 846−860.

[16] 何清, 赵景峰. 塔里木盆地浮尘时空分布及对环境影响的研究[J]. 中国沙漠, 1997, 17(2): 15−16, 18−22. [He Qing, Zhao Jingfeng. The studies on the distribution of floating dusts in the tarim basin and its effects on environment[J]. Journal of Desert Research, 1997, 17(2): 15−16, 18−22.]

[17] Meng Lu, Yang Xinghua, Zhao Tianliang, et al. Modeling study on three-dimensional distribution of dust aerosols during a dust storm over the Tarim Basin, Northwest China[J]. Atmospheric Research, 2019, 218: 285−295.

[18] 王森, 王雪姣, 陈东东, 等. 1961—2017年南疆地区沙尘天气的时空变化特征及影响因素分析[J]. 干旱区资源与环境, 2019, 33(9): 81−86. [Wang Sen, Wang Xuejiao, Chen Dongdong, et al. The spatial and temporal variation characteristics and influencing factors of dust weather in the southern Xinjiang from 1961 to 2017[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2019, 33(9): 81−86.]

[19] 张强, 王胜. 西北干旱区夏季大气边界层结构及其陆面过程特征[J]. 气象学报, 2008, 66(4): 599−608. [Zhang Qiang, Wang Sheng. A study on atmospheric boundary layer structure on a clear day in the arid region in Northwest China[J]. Acta Meteorology Sinica, 2008, 66(4): 599−608.]

[20] 李岩瑛, 张强, 张爱萍, 等. 干旱半干旱区边界层变化特征及其影响因子分析[J]. 高原气象, 2016, 35(2): 385−396. [Li Yanying, Zhang Qiang, Zhang Aiping, et al. Analysis on atmosphere boundary layer variation characteristics and their impact factors in arid region and semi-arid region over Northwest China[J]. Plateau Meteorology, 2016, 35(2): 385−396.]

[21] Petra S, Frank B, Svenerik G, et al. Review and intercomparison of operational methods for the determination of the mixing height[J]. Atmospheric Environment, 2000, 34(7): 1001−1027.

[22] 乔娟. 西北干旱区大气边界层时空变化特征及形成机理研究[D]. 北京: 中国气象科学研究院, 2009. [Qiao Juan. The Temporal and Spatial Characteristics of Atmospheric Boundary Layer and Its Formation Mechanism over Arid Region of Northwest China[D]. Beijing: Chinese Academy of Meteorological Sciences, 2009.]

[23] 李岩瑛, 张强, 陈英, 等. 中国西北干旱区沙尘暴源地风沙大气边界层特征[J]. 中国沙漠, 2014, 34(1): 206−214. [Li Yanying, Zhang Qiang, Chen Ying, et al. Vertical structure of atmosphere boundary layer during wind-sandstorm process over sandstorm source in arid area of Northwest China[J]. Journal of Desert Research, 2015, 34(1): 206−214.]

[24] 谭子渊. 中国西北干旱半干旱区边界层高度特征及其对沙尘天气影响的数值模拟研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2019. [Tan Ziyu-

an. Numerical Simulation of Boundary Layer Height and Its Effect on Dust Weather in Arid and Semi-arid Regions of Northwest China[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2019.]

[25] Wei W, Wu B G, Ye X X, et al. Characteristics and mechanisms of low-level jets in the Yangtze River Delta of China[J]. Boundary-Layer Meteorology, 2013, 149(3): 403–424.

[26] 张建涛, 王敏仲, 何清, 等. 塔克拉玛干沙漠腹地夏季夜间低空急流变化特征[J]. 中国沙漠, 2020, 40(5): 89–100. [Zhang Jiantao, Wang Minzhong, He Qing, et al. Variation characteristics of nocturnal low-level jet in summer over the hinterland of Taklimakan Desert[J]. Journal of Desert Research, 2020, 40(5): 89–100.]

[27] Wang Y, Klipp C L, Garvey D M, et al. Nocturnal low-level-jet-dominated atmospheric boundary layer observed by a Doppler lidar over Oklahoma City during JU2003[J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 2007, 46(12): 2098–2109.

[28] 郭萍萍, 杨建才, 殷雪莲, 等. 甘肃省春季一次连续浮尘天气过程分析[J]. 干旱气象, 2015, 33(2): 303–309. [Guo Pingping, Yang Jiancai, Yin Xuelian, et al. Analysis of a continuous floating dust weather in Gansu Province in spring[J]. Journal of Arid meteorology, 2015, 33(2): 303–309.]

[29] 徐安伦, 董保举, 刘劲松, 等. 洱海湖滨大气边界层结构及特征分析[J]. 高原气象, 2010, 29(3): 637–644. [Xu Anlun, Dong Baoju, Liu Jinsong, et al. Structure and characteristic of the atmospheric boundary layer in Erhai lakeside region of Dali[J]. Plateau Meteorology, 2010, 29(3): 637–644.]

[30] Zhang Wanchun, Guo Jianping, Miao Yucong, et al. On the summertime planetary boundary layer with different thermodynamic stability in China[J]. Journal of Climate, 2018, 31(4): 1451–1465.

[31] Barbaro E, Arellano J V, Ouwersloot H G, et al. Aerosols in the convective boundary layer: Shortwave radiation effects on the coupled land-atmosphere system[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2014, 119(10): 5845–5863.

[32] 赵伟, 刘红年, 吴涧. 中国春季沙尘气溶胶的辐射效应及对气候影响的研究[J]. 南京大学学报(自然科学版), 2008, 44(6): 598–607. [Zhao Wei, Liu Hongnian, Wu Jian. Radiative and climate effects of dust aerosol in springs over China[J]. Journal of Nanjing University(Natural Sciences Edition), 2008, 44(6): 598–607.]

[33] 张强, 张杰, 乔娟, 等. 我国干旱区深厚大气边界层与陆面热力过程的关系研究[J]. 中国科学: 地球科学, 2011, 41(9): 1365–1374. [Zhang Qiang, Zhang Jie, Qiao Juan, et al. Relationship of atmospheric boundary layer depth with thermodynamic process at the land surface in arid areas of China[J]. Scientia Sinica, 2011, 41(9): 1365–1374.]

[34] Lou Mengyun, Guo Jianping, Wang Lingling, et al. On the relationship between aerosol and boundary layer height in summer in China under different thermodynamic conditions[J]. Earth and Space Science, 2019, 6(5): 887–901.

[35] Hu Jun, Zhao Tianlian, Liu Jane, et al. Nocturnal surface radiation cooling modulated by cloud cover change reinforces $PM_{2.5}$ accumulation: Observational study of heavy air pollution in the Sichuan Basin, Southwest China[J]. Science of the Total Environment, 2021, 794: 148624.

Different diurnal effects of floating dust on the structures in the atmospheric boundary layer over desert areas

ZHU Congzhen[1,2], ZHAO Tianliang[1,2], MENG Lu[2], YANG Xinghua[3], HE Qing[2],
Ali MAMTIMIN[2], YANG Jie[1], ZHU Yan[1], WU Zhaoye[1]
(1. Key Laboratory for Aerosol-Cloud-Precipitation of China Meteorological Administration Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, Jiangsu, China; 2. Institute of Desert Meteorology, China Meteorological Administration, Urumqi 830002, Xinjiang, China; 3. School of Geography Science Shanxi Normal University, Taiyuan 030032, Shanxi, China)

Abstract: Based on data from four-times-daily intensive sounding and ground meteorological observations in the hinterland of the Taklamakan Desert in July 2016, this paper compares the structures in the atmospheric boundary layer and differences in surface radiation budget on sunny days and days with high amounts of floating dust ("floating dust days") to reveal the diurnal change in the effect of floating dust aerosols on the structure of the atmospheric boundary layer and its underlying mechanism. The results show that the height of the stable boundary layer at night on a sunny day and a floating dust day is 270 m and 360 m, respectively. The stable boundary layer inversion intensity on a sunny day reaches 3.1 K·(100m)$^{-1}$, which is stronger than 1.6 K·(100m)$^{-1}$ on a floating dust day. The convective boundary layer height is close to 3600 m on a sunny day and only 2700 m on a floating dust day. The downward long-wave radiation of floating dust aerosols at night weakens the radiative cooling of the surface, raises the height of stable boundary layer, and weakens its stability. In the daytime, the strong solar short-wave net radiation heats the desert surface, and its strong sensible heat creates an ultrahigh convective atmospheric boundary layer. Floating dust aerosol significantly reduces the surface short-wave radiation and sensible heating and reduces the height of the convective boundary layer during the day. The unique radiation effect of floating dust aerosols in the Tarim Basin has opposite influences on the structure of the atmospheric boundary layer during the day and night.

Keywords: Taklamakan Desert; structure of atmospheric boundary layer; radiative forcing of floating dust; diurnal change